

Submodelo de erosión en laderas para modelo precipitación–escorrentía en SIG

ALEJANDRO DUSSAILLANT J.

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

adussa@ing.puc.cl

Resumen La erosión hídrica en laderas produce pérdidas de suelo y fertilidad, así como contribuir al transporte de contaminantes—el mismo sedimento más compuestos adsorbidos a él (agroquímicos). Además, la erosión contribuye al embancamiento de ríos y lagos, canales de regadío y embalses. Es un problema particularmente serio en el secano central de Chile. Se presenta un modelo de erosión en laderas de base física que considera erosión por impacto de lluvia, erosión por flujo laminar y erosión por canalículos. Se basa en el concepto de capacidad de transporte, potencia de flujo disponible y en la presencia de una capa de sedimento depositado. Los resultados del modelo se comparan con resultados de parcelas experimentales, sin calibración previa, entregando buenos resultados para los eventos de lluvia más importantes del año 2002 para parcelas en el secano interior de Ninhue, VIII Región, Chile. Se propone que el actual modelo puede resultar útil para la estimación de la erosión en base a modelos hidrológicos distribuidos en SIG.

Palabras claves erosión, erodibilidad, potencia de flujo, Chile, zona árida

A hillslope erosion submodel for use with rainfall–runoff models in GIS

Abstract Hillslope erosion causes important soil and fertility loss, as well as contributing to contaminant transport (sediment and adsorbed chemicals). Also, erosion contributes to stream and lake sedimentation. Recent studies estimate that, worldwide, the 45 000 dams over 15 m high, trap more than 25% of global sediment and that these are losing between 0.5 and 1% of their capacity annually. The increase in soil erosion due to human mismanagement causes advancing desertification of the landscape. The aim of this work is to provide tools for decision making regarding erosion management decisions in the semiarid Secano area of Chile. A physically-based numerical erosion model has been developed so that it can be incorporated into distributed hydrological models; it considers rainfall erosion, sheet erosion, and rill erosion on a hillslope. The model will be applied to field plots where soil loss has been monitored. The numerical model (Hillslope Erosion Model, HES) is an event model and considers the hillslope length as divided into 1 m elements. Water and sediment can enter each element from upslope, and the Manning equation is used to estimate mean velocities. HES estimated total soil loss during the events rather well, obtaining good approximations for the different plot treatments, without using calibration of parameters. Sensitivity analysis showed that for sheet flow, the most sensitive parameters are percent cover and cohesion, and for rill flow, these are cohesion and slope. For both, the rill network has little effect.

Key words erosion; erodibility; stream power; Chile; arid zone

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica en laderas produce pérdidas de suelo y fertilidad, así como contribuir al transporte de contaminantes—el mismo sedimento más compuestos adsorbidos a él (agroquímicos). Además, la erosión contribuye al embancamiento de ríos y lagos, canales de regadío y embalses. Estudios recientes estiman que a nivel mundial, 45 000 represas de 15 m o más de muro, atrapan más del 25% del sedimento global (Vorosmarty *et al.*, 2003), y la Comisión Mundial de Represas estima que éstas estarían perdiendo entre 0.5 a 1% de su capacidad anualmente.

El aumento de la erosión hídrica de suelos debido al mal manejo de estos por la humanidad, inserto en una progresiva desertificación del territorio (Batchelor, 1995), requiere de información que permita priorizar las áreas que requieren protección, así como seleccionar las opciones de manejo más apropiadas para el contexto particular.

En particular, la motivación de este trabajo es proveer herramientas para la toma de decisiones para contribuir a la reducción de la erosión del secano central chileno, con potenciales beneficios para agricultores de subsistencia así como para la industria exportadora de altos ingresos (plantaciones forestales, frutales, viñedos, paltos).

Interesa desarrollar un modelo de erosión numérico con base física, para ser incorporado en modelos hidrológicos, que considere la erosión por impacto de lluvia, erosión laminar, y erosión por canalículos en una ladera. Se cuenta con datos de erosión para algunas localidades, así como un modelo de precipitación-escorrentía (Calle & Varas, 1998), al cual se pretende añadir el submodelo de erosión que concentra nuestra atención en este trabajo. El modelo será aplicado a parcelas donde se ha medido pérdida de suelo para evaluar su desempeño.



Fig. 1 Parcelas de erosión en Ninhue, secano interior, VIII Región, Chile.

METODOLOGÍA

Datos y modelo

Los datos provienen de 9 parcelas de 10×3 m (3 repeticiones de tratamiento: rotación, mínima labranza y pradera natural) del INIA-Chillán (Fig. 1). Se cuenta con datos para 2001–2003 de precipitación cada 15 minutos y totales de sedimentos por evento.

El modelo numérico es por evento, y considera dividir la ladera en elementos de 1 m de longitud o menos. Se prevé el ingreso de agua y sedimento desde la celda pendiente arriba, y se utiliza la ecuación de Manning para la estimación de la velocidad.

Erosión por impacto de agua de lluvia

Para estimar la erosión por impacto de lluvia, el modelo utiliza algoritmos del modelo EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998). Para la erosión por flujo, la base física sigue al modelo propuesto por Hairsine & Rose (1992) y Sempel *et al.* (2002). Se asume una red y sección dada, y se utiliza el concepto de capacidad de transporte.

Para la erosión por lluvia (Morgan *et al.*, 1998), la energía cinética por mm de lluvia caída e_k ($J m^{-2} mm^{-1}$) se estima de la intensidad de lluvia R , despreciando efectos del viento (van Dijk *et al.*, 2002) y con una correlación con la altitud z (m) para $z > 100$ m:

$$e_k = 28.3[1 - 0.52 \exp(-0.042R)] [0.0101z] \quad (1)$$

Para la pérdida de suelo por impacto de gotas KED ($g m^{-2}$), se usa (Morgan *et al.*, 1998):

$$KED = k \cdot E_k \exp(-bh) \quad (2)$$

donde k ($g J^{-1}$) es la erodibilidad, determinada experimentalmente (valor entre 1 y 6). E_k es la energía cinética total de la lluvia ($J m^{-2}$), h es la profundidad del agua (mm), y el valor de b varía entre 1 y 3 según textura del suelo.

Erosión por escurrimiento de agua superficial

Para la erosión por flujo, se modela según Fig. 2 (Hairsine & Rose, 1992), que asume $i = 1 \dots I$ clases de partículas, una tasa de depositación d_i , una tasa de resuspensión no selectiva r_{ri} y un equilibrio dinámico para la masa M de partículas, es decir:

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = d_i - r_{ri} = 0 \quad (3)$$

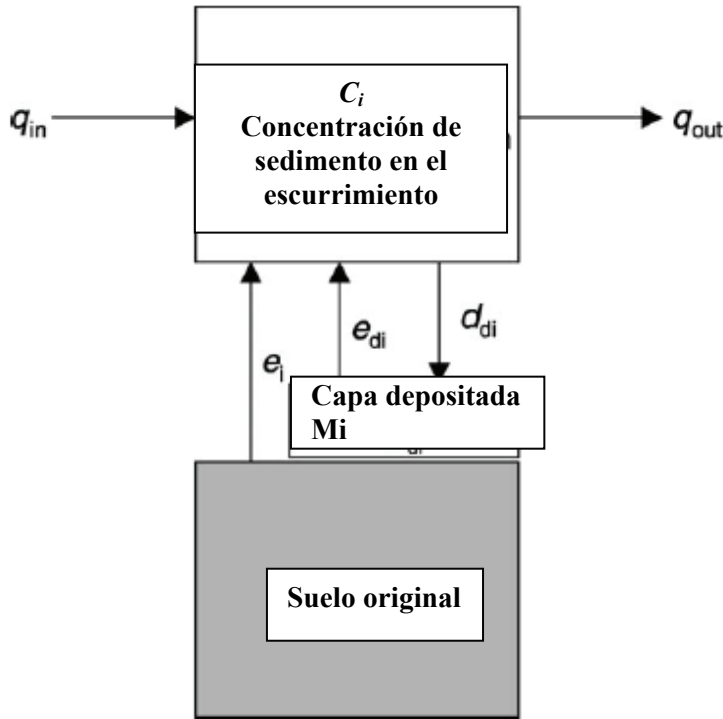


Fig. 2 Esquema del modelo de Rose de erosión por escurrimiento.

La capacidad de transporte es proporcional a la potencia del flujo ω ($= \rho g S R_h V$, con ρ masa específica del agua, g aceleración de gravedad, S pendiente del terreno, R_h radio hidráulico y V velocidad). La fracción disponible se estima como $F(\omega - \omega_0)$ – donde ω_0 es la potencia del flujo mínima para el movimiento – dado que la fracción $1 - F$ es disipada. Si la condición es limitada por transporte (i.e. todo el suelo está cubierto por capa depositada, Hairsine & Rose, 1992), la concentración de sedimento C es:

$$C_t = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \frac{F}{gh \sum_{i=1}^I v_i / I} [(\omega - \omega_0) + KED] \quad (4)$$

La vegetación reduce la potencia del flujo efectiva, reduciendo la velocidad por la rugosidad, y al proteger la capa depositada; reduciendo la suspensión y resuspensión.

Siepel *et al.* (2002) modificaron el modelo, suponiendo una partición de la tensión de corte debida al suelo, τ_s , y a la cubierta vegetal C_{veg} (% de cobertura), τ_{ss} :

$$\frac{\tau_{ss}}{\tau_s} = (1 - C_{veg})^p \quad (5)$$

donde p es un parámetro.

Con ello, la potencia efectiva queda definida como:

$$\omega = \tau_{ss} V = \rho g S R_h V (1 - C_{veg})^p \quad (6)$$

Por tanto, el modelo de erosión por flujo laminar queda:

$$C_t = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \frac{F}{\phi gh} [(\omega - \omega_0) + KED] \cdot (1 - C_{veg}) \quad (7)$$

con ϕ velocidad de sedimentación promedio entre clases de partículas.

Para los elementos con canalículos (surcos en el suelo), se siguen los supuestos de Hairsine & Rose (1992), que son: flujo hidráulicamente suave; canalículos trapezoidales y sin cubierta vegetal; erosión por gotas despreciable; potencia del flujo uniformemente en el perímetro mojado (P_{wr}); capa depositada restringida al fondo (ancho W_r); resuspensión no selectiva; equilibrio dinámico.

Así, el modelo de erosión por canalículos queda:

$$C_t = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \frac{F}{\phi g h} (\omega - \omega_0) \left(\frac{W_r}{P_{wr}} \right) \quad (8)$$

Finalmente, la solución de la erosión en cada elemento de ladera sigue los pasos: (1) asumir erosión neta en el elemento bajo cálculo; (2) calcular la concentración usando $C = C_t^\beta$, con (Morgan *et al.*, 1998): $\beta = 0.79 \cdot \exp(-0.85 \cdot J)$, con β coeficiente de eficiencia de pérdida por flujo y J (kPa) cohesión de la superficie; (3) realizar balance de masa para verificar que el supuesto de (1) fue correcto—si el sedimento entrante es mayor que el que sale, asumir deposición neta y recalcular C con $\beta = 1$ (i.e. $C = C_t$).

Para probar el modelo, se utilizaron los eventos del año 2002 con mayor transporte de sedimentos (julio 24, junio 3 y julio 22, Tabla 1). Los parámetros de erosión fueron los mismos utilizados por Siepel *et al.* (2002) (Tabla 2). Los parámetros de manejo para los 3 tratamientos se presentan en la Tabla 3. El exceso de lluvia fue diferente para cada tratamiento, y se utilizó el entregado por los datos de terreno sobre captura de escurrimiento.

Tabla 1 Eventos de lluvia para comparación con resultados del modelo de erosión.

Evento	Duración (h)	$I_{\max 15 \min}$ (mm h ⁻¹)	$I_{15 \min}$ (>4 mm h ⁻¹) (frecuencia)	Precipitación total (mm)
3 junio 2002	66	14.8	24	60.6
22 julio 2002	87	6.4	14	52.1
24 julio 2002	50	10.4	25	64.5

Tabla 2 Parámetros de erosión utilizados (según Siepel *et al.* 2002).

Parámetro	Unidad	Valor usado
Potencia unitaria de flujo crítica, ω_0	W m ⁻¹	0.2
Velocidad de sedimentación promedio, ϕ	m s ⁻¹	0.1
Fración efectiva de potencia de flujo, F	–	0.1
Parámetro de efecto de vegetación, p	–	3
Concentración mínima inicial, C_{\min}	mg L ⁻¹	1

Tabla 3 Parámetros para tratamientos de barbecho, mínima labranza y pradera natural.

Parámetro	Barbecho	MinLab	Pradera
Cohesión (kPa)	10	14.5	20
Cubierta vegetal, C_{veg}	0.1	0.7	0.7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se resumen en la Tabla 4. Se puede observar que salvo 2 casos a pendiente 12% y 18.5%, el modelo aproximó la producción de sedimentos relativamente bien, obteniendo buenos resultados cualitativos para los diferentes tratamientos de cubierta vegetal.

Se puede hipotetizar que las sobreestimaciones al inicio de la temporada pueden deberse a la compactación durante la siembra, y las sobreestimaciones hacia el final de la temporada de crecimiento vegetal pueden deberse a que se utilizó un porcentaje de cobertura fijo para toda la temporada. Estos son elementos a abordar en una profundización futura del presente ejercicio.

Se realizaron estudios sobre la sensibilidad de parámetros del modelo, de los cuales se concluyó que para flujo laminar, los parámetros más sensibles son la cubierta y la cohesión; para flujo en canalículos, éstos son la cohesión y la pendiente; para ambos, la red de canalículos no afecta mayormente.

En resumen, pareciera que una buena estimación del escurrimiento de agua, acoplada con estimaciones apropiadas de la cohesión y la cobertura, producen una estimación adecuada para la erosión, al menos para estos sitios y eventos. Debemos hacer notar que no se realizó calibración alguna, lo que es auspicioso. Esperamos en un futuro cercano complementar este análisis con más datos de forma de profundizarlo.

Tabla 4 Resultados del modelo (HES) versus resultados experiencias de terreno.

Tratamiento	$S = 12\%$ Sedimento (g)	Modelo HES (g)	HES/medición	$S = 18.5\%$ Sedimento (g)	Modelo HES (g)	HES/medición
Tradicional	2889	2547	88%	3504	9205	263%
Mínima labranza	1451	1800	124%	2831	1854	65%
Pradera	411	1682	409%	3268	1712	52%
Tradicional	2583	2230	86%	2169	5393	249%
Mínima labranza	845	937	111%	1728	1432	83%
Pradera	168	174	104%	759	706	93%
Tradicional	5425	5863	108%	10122	9390	93%
Mínima labranza	2264	1717	76%	8136	2862	35%
Pradera	395	910	230%	3521	2269	64%

Dado que este es un trabajo limitado y preliminar, resta aún mucho por hacer. Nuestro trabajo futuro incluye mayor análisis de datos: determinar la infiltrabilidad, cohesión y cubierta durante la temporada en las parcelas; y consideraremos un experimento de laboratorio bajo condiciones más controladas. En cuanto al modelo, se planifica: calibrar y validar con más datos (2004 a 2006); incorporar el algoritmo en nuestro modelo en GIS; y comparar los resultados con datos de pequeñas cuencas con monitoreo de sedimentos en la misma zona de estudio.

Agradecimientos El autor agradece el financiamiento entregado por la beca Coimbra para jóvenes investigadores latinoamericanos, la cual financió al autor en su estadía en Padova, Italia, entre Noviembre 2004 y enero 2005, período donde se realizó el estudio teórico, así como la gentil acogida del Departamento IMAGE de Ingeniería de la U. de Padova (profesores Di Silvio, Rinaldo, Gaion). Sinceros agradecimientos al INIA-Chillán, y particularmente Octavio Lagos, por la gentil entrega de los datos de terreno.

REFERENCIAS

- Abrahams, A. D., Li, G., Krishnan, C. & Atkinson, J. F. (2001) A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surf. Process. Landf.* **26**, 1443–1459.
- Agassi, M. & Bradford, J. M. (1999) Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Tillage Res.* **49**, 277–287.
- Barthes, B & Roose, E (2002) Aggregate stability as indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. *Catena* **47**, 133–149.
- Bryan, R. B. (2000) Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorph.* **32**, 385–415.
- Calle, G. & Varas, E. (2003) Hydrodynamic and geomorphologic processes in the hydrologic response of a watershed. *Revista Ingeniería Hidráulica en México* (in Spanish).
- Dussailant, A. R. (2002) Stormwater infiltration and focused groundwater recharge in a rain garden: numerical modeling and field experiment. PhD Thesis, Civil & Environmental Engineering, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Gao, B., Walker, M. T., Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y., Nakano, K., Rose, C. W. & Hogarth, W. L. (2003) Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment. *J. Hydrol.* **277**, 116–124.
- Hairsine, P. B. & Rose, C. W. (1992) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles. 1. Sheet flow. *Water Resour. Res.* **28**(1), 237–243.
- Hairsine, P. B. & Rose, C. W. (1992) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles. 2. Rill flow. *Water Resour. Res.* **28**(1), 245–250.
- Hogarth, W. L., Parlange, J.-Y., Rose, C. W., Sander, G. C., Steenhuis, T. S. & Barry, A. (2004) Soil erosion due to rainfall impact with inflow: an analytical solution with spatial and temporal effects. *J. Hydrol.* **295**, 140–148.
- Jetten, V., de Roo, A. & Favis-Mortlock, D. (1999) Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena* **37**, 521–541.
- Léonard, J. & Richard, G. (2004) Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena* **57**, 233–249.
- Liu, Q. Q. & Singh, V. P. (2004) Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation. *J. Hydrol Engng* **9**(5), 375–382.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M. E. & Folly, A. J. V. (1998) The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6 July 1998. Silsoe College, Cranfield University, UK.
- Nearing, M. A., Norton, L. D., Bulgakov, D. A., Larionov, G. A., West, L. T. & Dontsova, K. M. (1997) Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resour. Res.* **33**(4), 865–876.
- Raff, D.A., Ramirez, J. A. & Smith, J. L. (2004) Hillslope drainage development with time: a physical experiment. *Geomorph.* **62**, 169–180.
- Siepel, A. C., Steenhuis, T. S., Rose, C. W., Parlange, J.-Y. & McIsaac, G. F. (2002) A simplified hillslope erosion model with vegetation elements for practical applications. *J. Hydrol.* **258**, 111–121.